

正会員。池田尚治 (東京都立大学)

ブイ・バンドアン (同上)

宇治公隆 (同上)

1. 緒言

鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗機構はコンクリートの脆性的性質、鉄筋とコンクリートとの応力伝達特性等に大きく影響されるため極めて複雑である。そのため実用上はトラス理論に基いた方法などにより設計が行われているが、鉄筋コンクリートのせん断抵抗挙動の力学的な機構は、多くの研究者の努力にも拘らず未だ明確に把握されていない。そこで本研究は、このように複雑な鉄筋コンクリートのせん断の問題に関し基本的な点に立ち戻って検討を行うものであって、せん断抵抗機構の基礎的要因として、(1)鉄筋の付着の影響、(2)腹鉄筋の配置方法、(3)断面形状の影響の3種類の要因を選んで実験的、理論的研究を行い、鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗機構の解明を図ろうとするものである。

2. 鉄筋の付着の影響について

(1)実験方法 鉄筋の付着の良好なことは、ひびわれ分散性、鉄筋とコンクリートとの一体性及び定着性等によって極めて重要なことであるが、鉄筋の付着性能が劣っている方がはりのせん断耐力を増加させるという報告もあり⁽¹⁾、鉄筋の付着と部材の耐力との関係については未だ基本的な点で解明されていない重要な事柄が存在しているものと思われる。そこで、ここでは鉄筋コンクリート部材のせん断破壊耐力に及ぼす鉄筋の付着の影響について基礎的に研究を行い、付着がせん断破壊の形態に及ぼす影響、付着とせん断耐力との関係及びはりの残存アーチ機構等に関する事柄を実験により求め、これらを有限要素法による解析結果と比較考察することとした^{(2),(3)}。

鉄筋は、主鉄筋に3×D13 (SD30)、腹鉄筋(鉛直スターラップ及び45°筋)にはφ6 (SR24相当品)を使用した。コンクリートの圧縮強度は240 kg/cm²である。本実験では付着の有無を実験の主要因とし、 a/d の相違、腹部補強の有無を関連要因として供試体を製作した。供試体の形状は、腹鉄筋のないはりについては a/d が1.5~5.0の6種類とし、腹鉄筋のあるはりについては a/d を1.5と2.5の2種類とした。載荷は単純支持状態で対称2点集中荷重とした。各供試体の a/d の値、付着の有無、腹鉄筋の有無は表-1に示す通りである。供試体の断面寸法は、幅10cm、高さ20cm、有効高さ18cmの長方形である。鉄筋の付着を除く方法としては、はり供試体の両支点間の引張主鉄筋部分のふし間を蠟で埋め、その上にビニールテープを巻き、更にその上にグリースを塗って完全に付着のない状態とした。腹鉄筋の配置は、スターラップ7.5cm間隔、45°筋15cm間隔とした。

(2)実験結果 腹部補強がなく、付着のないはりでは、 a/d が1.5及び2.0の供試体は割裂破壊であった。又、 a/d が2.5から5.0までのはりでは、支間中央に早期に曲げひびわれが発生するのみの曲げ引張破壊であった。一方、付着がある場合には、 a/d が1.5から5.0までのすべての供試体が斜めひびわれの発生を伴ってせん断破壊

表-1 実験結果

No.	記号 ^{注1)}	破壊荷重	破壊モーメント	せん断応力度	破壊形態 ^{注2)}	No.	記号	破壊荷重	破壊モーメント	せん断応力度	破壊形態
1	1.5-N-0	11.70 ^t	1.58 ^{t-m}	37.1 kg/cm ²	SP	9	2.5-B-0	4.79 ^t	1.08 ^{t-m}	15.2 kg/cm ²	DT
2	2.0-N-0	10.54	1.90	33.5	〃	10	3.0-B-0	4.42	1.19	14.0	〃
3	2.5-N-0	10.21	2.30	32.4	FL	11	3.5-B-0	4.70	1.48	14.9	〃
4	3.0-N-0	8.00	2.16	25.4	〃	12	5.0-B-0	4.34	1.95	13.8	〃
5	3.5-N-0	7.45	2.35	23.7	〃	13	1.5-N-W	15.00	2.03	47.6	SC
6	5.0-N-0	4.88	2.20	15.5	〃	14	2.5-N-W	10.56	2.38	33.5	FL
7	1.5-B-0	11.56	1.56	36.7	SC	15	1.5-B-W	13.60	1.84	43.2	SC
8	2.0-B-0	5.76	1.04	18.3	〃	16	2.5-B-W	12.20	2.75	38.7	FL

注1) 記号は、 a/d の値、付着あり:B、付着なし:N、腹部補強あり:W、腹部補強なし:0、tを表わす。

注2) 破壊形態は、割裂破壊:SP、曲げ破壊:FL、斜め引張破壊:DT、せん断圧縮破壊:SC、tを表わす。

した。腹部補強してあるはりでは、 a/d が2.5の場合、付着の有無にかかわらず曲げ引張破壊であった。しかし a/d が1.5のはりでは腹部補強が不十分であるため、斜めひびわれが開口し曲げ引張破壊には至らなかった。表-1に各供試体の最大耐力及びそれから求められる最大モーメント、最大せん断応力度を示す。最大モーメントと a/d の関係を図示したのが図-1である。図-1から明らかのように、腹部補強がない場合には、鉄筋とコンクリートとの間に付着が存在すると、一般にKaniの図として知られている最大モーメント- a/d の関係図の如く a/d が2.5付近で最大モーメントが大きく落ち込むが、付着が存在しない場合には全くこのような現象は見られない。本実験の場合、付着の存在によって耐力が約 $1/2$ 以下にまで低下しているのである。これは付着が存在しないと最初から鉄筋表面部から一種のせん断破壊の状態にあり、引張主鉄筋より上側のコンクリートが何ら害されることなく有効に働き、強固な残存アーチリブを形成してはりの残存アーチ耐力を著しく高めているからである。一方、付着がある場合には斜めひびわれ発生後、斜めひびわれより上側のコンクリートだけで残存アーチリブを形成するために、大きな耐力を保持することが困難なのである。又、腹部補強がある場合、付着のないはりについては a/d が2.5程度より大きい場合には、腹部に斜めひびわれが発生しないために腹部補強の効果は現れないことになる。しかし、 a/d が2.0程度以下の場合には、腹部に割裂ひびわれが発生するために腹部補強によって終局耐力を増加させることができる。

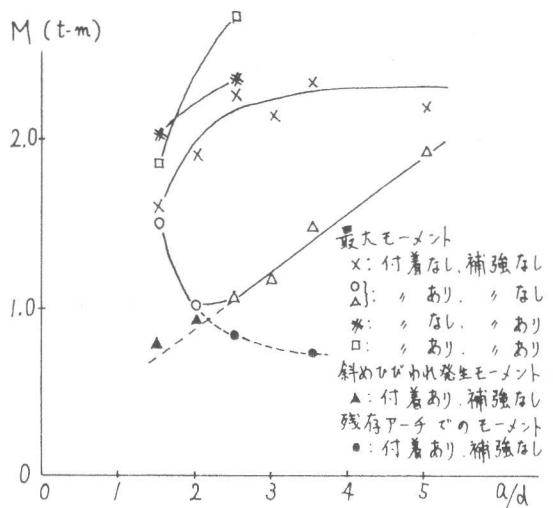


図-1 最大モーメントの図(実験値)

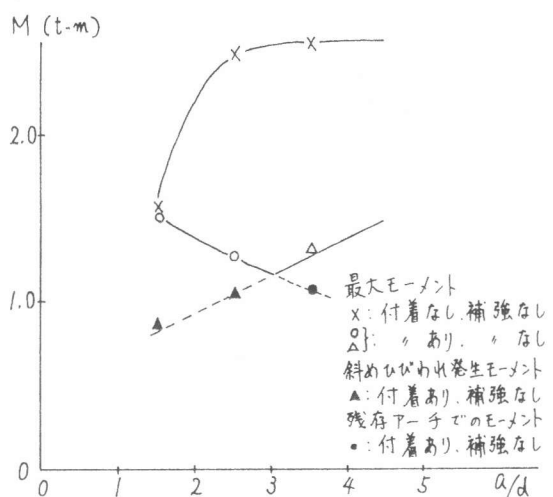


図-2 最大モーメントの図(解析値)

一方、付着があるはりについては、すべてのはり斜めひびわれを生ずるので腹部補強が有効に作用するといえる。尚、腹部補強がある場合に、 $a/d = 2.5$ について付着の有無で比較すると、付着がある方が高い値を示す。これは、付着がない場合には鉄筋が伸びて平面保持が成り立たないためである。

(3)有限要素法による解析 鉄筋コンクリート部材のせん断機構をできるだけ明確に把握するため、腹部補強のない供試体について、単純なモデル化をし、有限要素法により弾性解析を行った。破壊形態としては曲げ破壊、斜め引張破壊、せん断圧縮破壊、割裂破壊の4つに限定した。このようにして腹鉄筋の配置されていない供試体のうち a/d が1.5, 2.5, 3.5について鉄筋の付着の有無を考慮して計算を行った。図-2に計算から求められる最大モーメントと a/d の関係を示す。この図は、図-1に示した実験結果と傾向がよく一致しており、このように単純化した解析でも鉄筋コンクリートはりの耐荷挙動をよく表現し得ることが明らかとなったのである。以上に述べたように、鉄筋コンクリート部材のひびわれ分散性、鉄筋とコンクリートとの一体性、定着性等の面で付着が十分であることは望ましいが、腹部補強がない場合においては、鉄筋の付着がせん断耐力に極めて大きな悪影響を与えることが実験的かつ理論的に明らかにされた^{(2),(3)}。

3. 腹鉄筋の配置について

(1)実験方法 腹鉄筋のせん断抵抗機構に關し、折曲げ鉄筋とスターラップとの併用効果についての研究は現在までほとんど行われていなかった。ここでは、45°筋と鉛直スターラップによりせん断補強を行ったはり腹部のせん断抵抗機構について基本的に検討を加える事とした⁽⁴⁾。実験に用いた供試体は腹部厚を小さくしたI形断面であり、その概要は図-3に示す通りである。供試体の設計に当っては、腹鉄筋の配置方法及び斜めひびわれ

の制御等を要因として選定した。斜めひびわれの制御は、供試体にあらかじめスリットを導入しひびわれを理想化する事によって、はり腹部でのせん断抵抗の分担をより明確にしようとするものである。尚、折曲げ鉄筋は、主鉄筋を曲げ上げたものではなく、45°の角度で曲げ加工を行った治え筋を使用した。載荷方法は集中2点載荷とし、せん断支間有効けた高比 a/d を2.7として行った。

(2)実験結果及び考察 図-4は、折曲げ鉄筋とスターラップ両者の位置関係が異なる事によって、耐力及び靱性に顕著な差を生ずる様子を示した荷重・たわみ曲線の比較図である。両供試体ともにせん断補強量は同一であるが、一方はせん断補強鉄筋として45°筋およびそれと交叉するスターラップとが有効に作用しているのに対し、他方は45°筋のみがせん断力に抵抗する結果となり、部材の最大荷重に約30%の差を生じたのである。すなわち、数字上のせん断補強量は十分であっても、腹部内での配筋方法によっては、腹鉄筋の有効性が低減する場合があるのである。

図-5は、スリットを入れた側の45°筋およびスターラップの荷重-ひずみ曲線である。45°筋は、荷重の増加とともにひずみが増大し、その有効性が認められたが、45°筋と交叉しないスターラップに発生するひずみは小さく、場合によっては圧縮ひずみも見られたのである。腹鉄筋すなわち折曲げ鉄筋及びスターラップの有効性の相違は、斜めひびわれの発生する位置によって変化するが、この斜めひびわれの発生する位置は、部材内部の配筋状態、配筋量に応じて決定するものと考えられ、腹鉄筋量、腹鉄筋配置方法が腹鉄筋自身の有効性を左右する事が示された。従って、従来より考えられている鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷メカニズムをトラス理論で説明する場合のスターラップ、折曲げ鉄筋両者のせん断抵抗の累加は場合によっては危険側になる事が明らかとなった⁽⁴⁾。

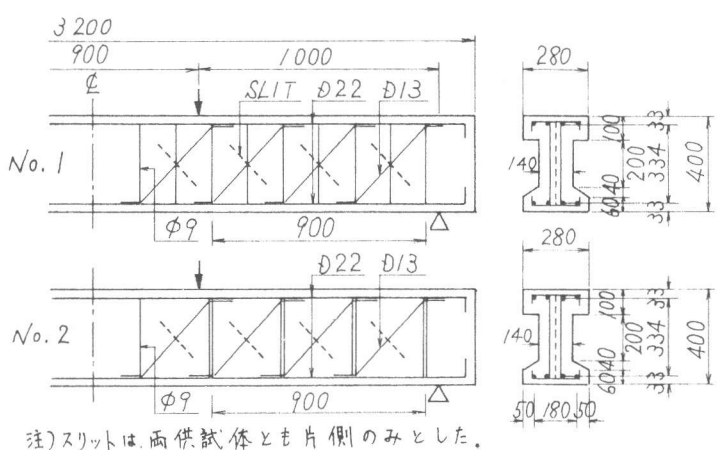


図-3 供試体概要図⁽⁴⁾

4. 断面形状の影響について
 (1)実験方法 鉄筋コンクリート部材のせん断抵抗機構は部材の断面形状によって相当に異なるものと思われる。ここでは、鉄筋コンクリート橋脚の断面を想定して上、下フランジの厚さ、ウェブの厚さ、等を変化させた供試体15体を作製して実験的検討を行った。供試体は、けた高を30cm、フランジ幅を20cm、長さを2mとした。コンクリートは設計基準強度を240 kg/cm²とした。図-6に各供試体の断面図を示す。載荷は対称2点集中荷重とし、 a/d を2.5とした。

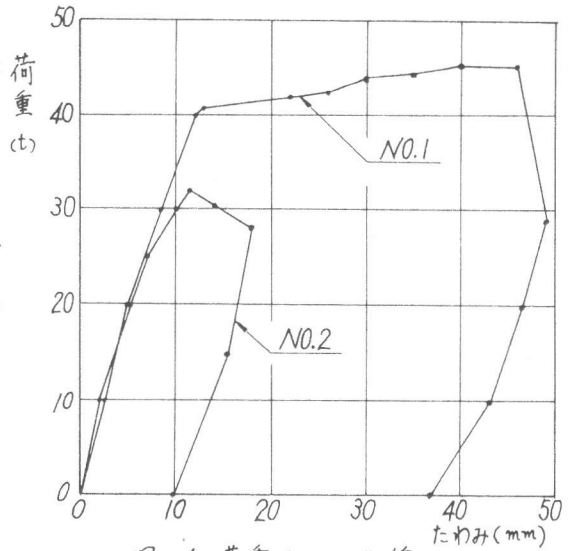


図-4 荷重-たわみ曲線

4. 断面形状の影響について

(2)実験結果 表-2に各供試体の概要と載荷試験結果を示す。この表から明らかのように、斜めひびわれ発生時のせん断応力度を $\tau = \frac{S}{b_w d}$ で算出するとその値は供試体の断面形状によって3倍程度まで異なっている。すなわち、フランジ部分がウェブ部分に比べて相対的に大きくなると、斜めひびわれ発生時のウェブのせん断応力度が相当に増大するのである。

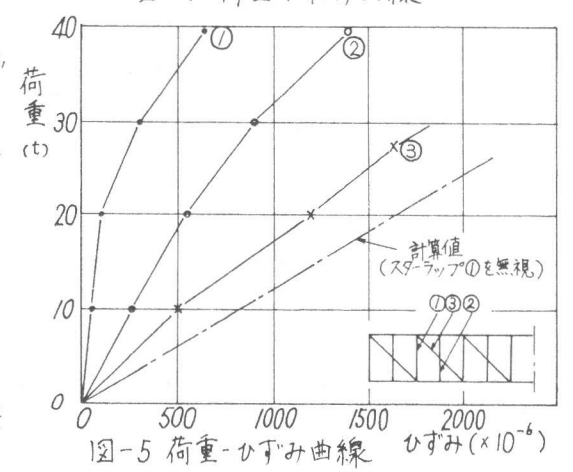


図-5 荷重-ひずみ曲線

これは、現在まで主として圧縮フランジが負担するせん断力として評価されていたものであるが、本実験のように下フランジの断面も有効に働いていることが明らかである。そこで、斜めひびわれ発生荷重に対しては大胆に断面のすべての部分が同一に寄与すると仮定して、斜めひびわれ発生荷重をコンクリート全断面積で除いた平均せん断応力 S/A_c を算出してみると、表-2に示されるように断面形状の大幅な相異に拘らずほぼ一定の値となっている。このことを考慮して斜めひびわれ発生荷重 (S_c) を表現すれば、

$$S_c = 0.45 \sqrt{\sigma_{ck}} (A_c + 15 A_s) \quad \text{--- (1) となる。}$$

この式の中で A_s/d の影響は含まれていないが、これは A_s/d が 2.5 以上の場合を生じて対象としたからである。

腹鉄筋が配置されていない場合の終局耐力は、いずれの供試体も斜めひびわれ発生後の残存アーチ機構の耐力で決定されるため、ウェブの厚さの影響は相対的に小さいように見られた。腹鉄筋の配置されたはりでは終局時にいずれもスターラップが降伏点に達し、せん断破壊の様相を示したが腹鉄筋の存在のため、靱性的な挙動を示した。

鉄筋の付着を除去した供試体は割裂で破壊し、その耐力は同一寸法で付着のある供試体に比べ、斜めひびわれ荷重で約 2.3 倍、破壊荷重で約 1.6 倍となった。従って 2. で述べた成果が I 形断面の場合にも全く妥当なものであることを確認できたのである。

5. 結言

本研究の結果、鉄筋の付着が鉄筋コンクリートの斜め引張破壊に重大な影響を与えること、折曲げ鉄筋とスターラップとの併用のメカニズムが把握されたこと、及び断面形状と斜めひびわれ荷重との関係が定量的に求められたこと、等のせん断に関する基本的な事項が明らかにされた。

謝辞：本論文を作成するに当たり御協力いただいた信田任延氏（現鹿島建設）をはじめとする都立大学土木材料研究室の学生諸氏及び助手の方々に厚く御礼を申し上げる。なお、本研究に対して昭和 52 年度及び 53 年度に文部省科学研究費補助金一般研究 C、No. 255180 が交付された。ここに関係各位に深く謝意を表する次第である。（参考文献）

- (1). Kani, G.N.J., The Riddle of Shear Failure and Its Solution, Journal of ACI No. 61-28, April 1964
- (2). 池田, 宇治, 鉄筋コンクリートはりの残存アーチ機構について, 土木学会第 33 回年次講演集, V-141, 1978 年
- (3). 池田, 宇治, 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究, 土木学会論文報告集に投稿中
- (4). 池田, 信田, 鉄筋コンクリート部材のせん断耐荷機構に関する研究, 土木学会第 33 回年次講演集 V-139, 1978 年

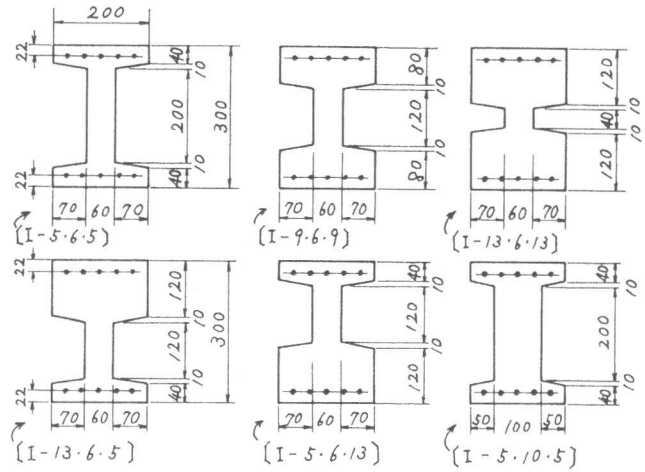


図-6 供試体の断面形状図

表-2 供試体の断面形状と実験結果の概要

No.	鉄筋	断面	斜めひびわれ発生時の実験値			終局時の実験値			(1)式による S_c の計算値(前号)
			S_c	$\tau_c = \frac{S_c}{A_w d}$	$\tau_c = \frac{S_c}{A_c}$	S_u	$\tau_u = \frac{S_u}{A_w d}$	$\tau_u = \frac{S_u}{A_c}$	
1	5D13	長方形 20.30	4.5 ton	8.1 $\frac{kg}{cm^2}$	7.5 $\frac{kg}{cm^2}$	6.0 ton	10.8 $\frac{kg}{cm^2}$	10.0 $\frac{kg}{cm^2}$	4.84 ton (1.08)
2	5	I-5.6.5	2.0	12.0	6.5	3.0	18.0	9.8	2.79 (1.40)
3	5D10		1.5	9.0	4.9	2.6	15.6	8.5	2.51 (1.67)
4	5D13	I-5.10.5	3.0	10.8	7.7	4.5	16.2	11.5	3.38 (1.13)
5	5	I-5.6.13	3.0	18.0	7.2	5.75	34.5	13.8	3.58 (1.19)
6	5	I-13.6.5	3.0	18.0	7.2	4.25	25.5	10.2	3.58 (1.19)
7	5	I-9.6.9	3.5	21.0	8.4	4.65	27.9	11.1	3.58 (1.02)
8	5	I-13.6.13	4.0	24.0	7.5	4.4	26.4	8.3	4.36 (1.09)
9	5	I-5.6.5 NB	4.5	27.0	14.7	4.5	27.0	14.7	-
10	5	I-5.10.5 NB	7.35	26.4	18.8	7.35	26.4	18.8	-
11	5	I-5.6.5 W	2.5	15.0	8.2	7.2	43.2	23.5	2.79 (1.12)
12	5D10	I-5.6.5 W	2.0	12.0	6.5	5.5(曲り)	33.0	18.0	2.51 (1.26)
13	5D13	I-5.6.5 HW	2.0	12.0	6.5	8.4	50.4	27.5	2.79 (1.40)
14	5	I-5.10.5 W	3.0	10.8	7.7	8.35	30.0	21.4	3.38 (1.13)
15	5	I-13.6.13 W	4.5	27.0	8.5	8.7	52.2	16.4	4.36 (0.97)

備考: NB: 付着なし, W: 腹鉄筋 D6 etc 100, HW: 腹鉄筋 D10 etc 100, W: 腹幅